第46卷 第4期
2023年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 4
Apr. 2023

四合木(*Tetraena mongolica*)的潜在适生区预测及其与自然保护区GAP分析

董子彦[1]， 马 乐[1]， 高姝晗[1]， 韩 鹏[1]， 张 庆[1,2]， 包玉凤[3]

(1. 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室/内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古 呼和浩特 010021；
2. 草原生态安全省部共建协同创新中心，内蒙古 呼和浩特 010021；
3. 内蒙古自治区通辽市水文勘测局，内蒙古 通辽市 028000)

摘 要：明晰物种的潜在分布区及其与当前自然保护区的空缺，对于合理高效地开展濒危物种保护具有重要的意义。为了预测四合木(*Tetraena mongolica*)在当代(2020s)及未来(2060s、2100s)的分布范围，以及自然保护区对四合木的保护现状，以四合木为对象，利用最大熵模型(The maximum entropy model software，MaxEnt)结合23个环境变量预测其在内蒙古自治区西鄂尔多斯与宁夏回族自治区的潜在适生区，并与当前四合木自然保护区进行了保护空缺分析。结果表明：(1) MaxEnt模型的受试者工作特征曲线下的面积为0.977，表明预测结果准确。(2) 影响四合木分布的主要环境因子是最湿月降水量，其次是最干月降水量、距道路距离、等温性、最冷季平均温度、坡度。(3) 研究区内四合木当前适生面积为4717 km^2；2020s—2100s四合木潜在分布区退缩，并向西北部偏移。(4) 基于保护空缺分析，当前仅有14.88%四合木的适宜生境位于保护区内，大面积的四合木适生区未设立自然保护区，这些地区主要集中在内蒙古乌海市和鄂尔多斯市杭锦旗。研究结果旨在为四合木保护及其自然保护区建设提供科学指导。

关 键 词：四合木；MaxEnt模型；潜在适生区；GAP分析

文章编号：1000－6060(2023)04－0595－09(0595～0603)

面对“第六次生物大灭绝”的严峻形势，保护生物多样性的一个重要内容就是拯救濒危物种[1]。一个地区的物种承载力会受气候变化而变化，同时会影响种群变化和物种的地理分布，进而驱动物种多样性格局[2-5]。因此，气候变化对生物多样性的影响是当前学者们研究的热点问题[6-8]。开展濒危物种气候变化背景下的潜在分布区预测，对于合理开展该物种保护具有重要参考价值[9]。

物种分布模型是研究物种适宜生境受气候环境变化影响的重要工具，其通过目标物种的地理分布及环境数据进行估算，从而预测满足该物种生态位要求的潜在分布区[10-11]。物种分布模型应用于全球多个研究领域，包括生态位因子分析、规则集遗传算法、区域环境模型、生物气候模型和最大熵模型(The maximum entropy model software，MaxEnt)等。其中，MaxEnt预测的结果精确度高[12]，即使在目标物种分布点相对少时，该模型也能够取得相对准确的预测结果[13-14]。采用环境因子进行物种分布预测时往往选取三类因子，第一类是包括温度、降水等被广泛采用的气候因子；第二类是地形因子，常常会用到高程、坡度、坡向数据；第三类因子是人类干扰因子，多采用距道路距离代表该因子[15-16]。

建立自然保护区并对物种进行就地保护是对生物多样性保护最有效方法，可以保护生态系统多

收稿日期：2022-06-16； **修订日期**：2022-08-18
基金项目：内蒙古自治区重大专项(2021ZD0008)；国家自然科学基金(32071582)；内蒙古科技计划项目(2021GG0392)资助
作者简介：董子彦(1997-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区植被恢复等方面的研究. E-mail: dong_zi_yan@163.com
通讯作者：张庆(1981-)，男，教授，主要从事生物多样性和景观生态学等方面的研究. E-mail: qzhang82@163.com

样性、物种多样性、遗传(基因型)多样性[17]。明晰物种的潜在分布区,则是合理规划物种自然保护区的重要依据。MaxEnt模型在保护濒危动植物研究中被广泛运用。万基中等[18]通过物种分布模型MaxEnt有效划分出在气候变化压力下东北红豆杉优先保护区,并为其保护提供解决方案,同时有效评估现存自然保护区的贡献,为其合理规划提出参考意见,从而保护该物种的生物多样性。

四合木(*Tetraena mongolica*)属古地中海孑遗濒危植物,作为我国二级濒危保护植物,被誉为“活化石”和植物中的“大熊猫”[19-20]。众多学者对四合木保护开展了广泛研究,包括分子标记的开发、种群遗传结构、群落物种、物种多样性等[21-22]。研究表明不同气候条件下四合木实生苗生长量、光合速率存在显著差异,气候是影响其分布的关键因素[23]。为了保护四合木,目前全国设立了两处自然保护区,分别是贺兰山自然保护区和西鄂尔多斯自然保护区。但是当前及未来气候变化下四合木自然保护区建设的合理性还不明晰。因此,基于当下四合木地理分布数据和相关的气象数据,本研究利用ArcGIS 10.8.1软件的空间分析技术和MaxEnt模型,探究影响四合木地理分布的主导环境因子,进一步模拟当代(2020s)、未来(2060s、2100s)气候背景下的潜在分布范围,并将其与当前自然保护区进行保护空缺分析(Protection gap analysis,GAP),以期为四合木保护及四合木自然保护区规划提供合理指导。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区西鄂尔多斯(37°35′~49°51′N、106°43′~111°27′E)和宁夏回族自治区(35°14′~39°23′N、104°17′~107°39′E)。整个研究区属于温带大陆性气候,年平均气温6~9 ℃,年平均降水量150~330 mm,无霜期120~180 d。北部为乌拉特草原,南部地处黄河水系,西部是贺兰山西麓,东部为鄂尔多斯高原。研究区内天然林资源丰富,主要有四合木(*Tetraena mongolica*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等天然灌木林。研究区内的四合木主要分布在内蒙古自治区鄂尔多斯市西部、乌海市、巴彦淖尔南部、阿拉善东部和宁夏回族自治区石嘴山市。全国两处四合木自然保护区,即贺兰山自然保护区和西鄂尔多斯自然保护区均位于研究区内。贺兰山自然保护区和西鄂尔多斯自然保护区分别建立于1982、1995年,并分别于1988、1997年经国务院批准晋升为国家级自然保护区[24]。

2 数据与方法

2.1 样点数据获取与处理

本研究通过文献检索来确定四合木当前分布样点。在中国知网以“四合木”为关键词,检索截止到2021年12月31日的文献,共检索344篇文献,其中17篇文献包括四合木的详细样点信息(表1),共收集到165个四合木样本记录点(图1),获取各样点经度、纬度、海拔信息,将其作为MaxEnt软件四合木实际分布数据。

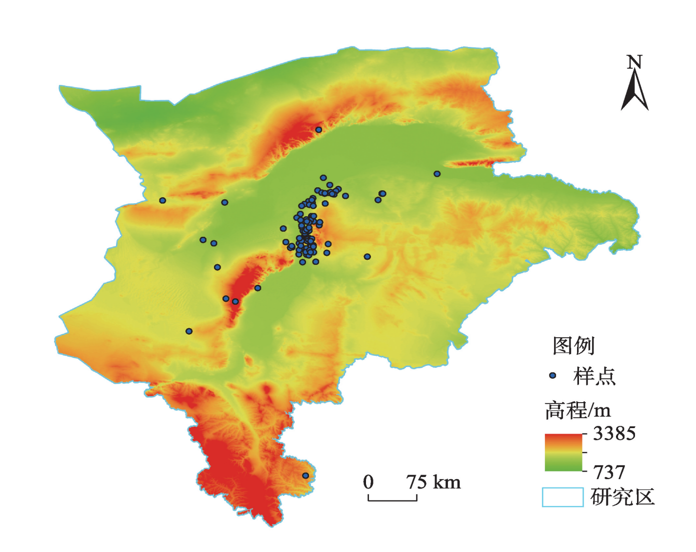


图1 四合木分布点

Fig. 1 Distribution map of *Tetraena mongolica*

2.2 环境变量数据获取

本研究采用23个环境因子,包括三类。其一,当前和未来时期气候条件下有关温度和降水等19个气候环境因子(表2)。从全球气候数据库WorldClim2.1(http://www.worldclim.org)获取气候因子数据,选取当代2020年及未来2060年和2100年3个时期的数据,数据采用CNRM-CM6-1模式中的2.5 minutes分辨率。其二,共包含高程、坡向和坡度3个地形因子。地理空间数据云(http://www.scloud.cn)下载高程数据,坡度数据和坡向数据在ArcGIS

表1　四合木采样点数据库

Tab. 1　Sample point database of *Tetraena mongolica*

文献名	发表日期(年-月-日)	样点数量
孑遗濒危植物四合木群落组成、物种多样性及土壤养分含量	2020-08-24	28
珍稀濒危植物四合木Genic-SSR标记的开发及种群遗传学研究	2021-06-05	20
荒漠孑遗植物四合木对土壤古菌群落的影响	2021-03-08	3
基于ISSR分子标记的孑遗濒危植物四合木遗传结构分析	2020-11-16	6
内蒙古西部地区蒺藜科花粉光学显微特征与分类学意义	2020-07-16	1
珍稀濒危植物四合木对水分增加的表型可塑性	2019-07-22	1
孑遗濒危植物四合木的地理分布与潜在适生区预测	2019-06-15	56
分子标记技术在中国濒危植物遗传分析中的应用——以四合木、蒙古沙冬青为例	2019-05-01	9
西鄂尔多斯高原5种荒漠灌丛土壤碳排放特征	2018-07-15	1
9种典型荒漠植物生态化学计量学特征分析	2018-01-09	2
乌兰布和沙漠降水量对典型灌木群落结构及多样性的影响	2015-09-12	1
煤矿开采沉陷对四合木的影响与保护对策研究	2013-12-16	7
人为干扰对乌海市四合木小灌木景观的影响	2014-03-13	7
不同生育期四合木抗氧化系统的变化及生境间差异	2012-05-15	5
扩展点格局分析方法在灌木种群空间分布格局研究中的应用	2011-12-15	11
濒危植物四合木生境的景观动态与适宜性评价研究	2008-06-01	2
中国荒漠区东部花粉对植被的指示性研究	2005-07-15	3

表2　环境变量

Tab. 2　Environment variable

环境因素	环境因子	单位
气温	年平均气温	℃
	昼夜温差月均值	℃
	等温性	%
	温度季节性变化	℃
	最暖月最高气温	℃
	最冷月最低气温	℃
	温度年较差	℃
	最湿季平均气温	℃
	最干季平均气温	℃
	最暖季平均气温	℃
	最冷季平均气温	℃
降水量	年降水量	mm
	最湿月降水量	mm
	最干月降水量	mm
	降水量季节性变异系数	
	最湿季降水量	mm
	最干季降水量	mm
	最暖季降水量	mm
	最冷季降水量	mm
地形	海拔	m
	坡度	(°)
	坡向	
人为因素	距道路距离	m

10.8.1中，利用高程数据从空间分析工具获得。其三，距道路距离作为人类干扰因子，从全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn)获取2020年1:1000000道路矢量数据，并通过ArcGIS 10.8.1中的欧式距离计算，分别得到研究区域各个样点距道路的最短距离。所有环境变量均通过重采样转化为ASCII栅格数据，并统一为WGS1984投影坐标系统。

2.3　四合木保护区数据

从中国科学院资源与环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)获取四合木自然保护区数据。研究区内有2个四合木自然保护区，一个位于内蒙古自治区鄂托克旗西部和乌海市境内的西鄂尔多斯自然保护区，一个位于宁夏西部，贺兰山山脉东坡的北段和中段的宁夏贺兰山国家级自然保护区。将四合木自然保护区范围与四合木适宜生境地图叠加，筛选出未被纳入自然保护区的四合木适宜生境。

2.4　MaxEnt模型的构建

为避免过度拟合，将物种分布点设置1 km缓冲区，删除缓冲区内多余分布点，共得到筛选后的105个四合木分布点。选取25%分布点作为测试集，75%分布点作为训练集，以受试者工作特征曲线

(Receiver operator characteristic, ROC)下的面积(The area under the ROC curve, AUC)来评估模型预测的准确性。通过刀切法测定各环境因子的权重,识别影响四合木空间分布的主要环境因子。对响应曲线进行分析,得到各环境因子的适宜性阈值,模拟得到四合木在当前(2020s)以及未来(2060s、2100s)3个时期的潜在分布区。自然断点法是一种被广泛使用的分类方法,依据数值统计分布规律分级和分类的统计方法,通过运用聚类思维,兼顾每组间要素的范围和个数尽量相近,最大化每一组内部的相似性[25]。利用自然断点法划分分布区,把分布区按时期划分为非(0~0.052)、低(0.052~0.192)、中(0.192~0.462)、高(≥0.462)适生区4个等级。

3 结果与分析

3.1 MaxEnt模型评价及预测准确性

MaxEnt中受试者工作特征ROC曲线反应模型运算的精确度,其与横坐标围成的面积成正比,AUC取值范围为0~1,值越接近1,MaxEnt模型预测及结果越精确[26]。AUC值0.5~0.6说明模型预测结果不及格;0.6~0.7说明模型预测结果较差;0.7~0.8说明模型预测结果一般;0.8~0.9说明模型预测结果良好;大于0.9说明模型预测结果优秀,准确性较高[27]。研究区内四合木潜在分布区预测AUC值为0.977,说明本研究预测结果较为准确,适合用于评估研究区内的四合木生境适宜性。

3.2 环境因子对四合木生境的影响

通过分析2020s影响四合木环境因子贡献率(图2),发现最湿月降水量的贡献率最大(22.9%)。其次分别是最干月降水量、距道路距离、等温性、最冷季平均气温、坡度。前3种占环境因子贡献率60%以上。进一步分析四合木在前4种主要气候因子的适生范围,发现四合木最适宜生境的环境条件为:最湿月降水量30~70 mm区间最佳;最干月降水量越多越好;等温性在25%~29%时最适宜四合木生长;最冷季平均气温低于−6 ℃最佳(图3)。

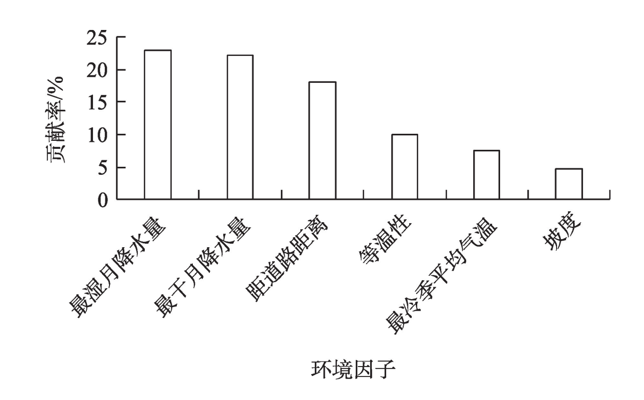


图2 影响四合木潜在分布区环境因子贡献率

Fig. 2 Contribution of environmental factors to the potential distribution of *Tetraena mongolica*

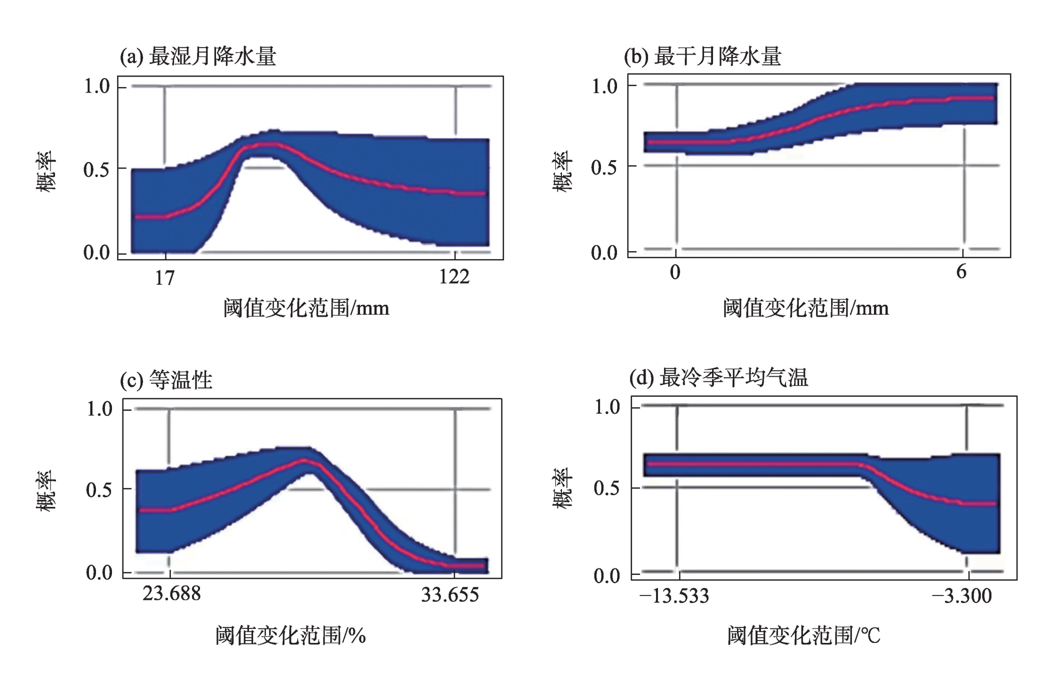


图3 四合木分布的环境变量响应曲线

Fig. 3 Response curve of environmental variables of *Tetraena mongolica*

3.3 四合木的潜在适生分布范围

通过自然断点法划分出四合木四类适宜生境，将最适宜生境和中等适宜生境统称为适宜生境。在2020s、2060s、2100s 3个时期，四合木适生区分布范围呈现先降低后略有增加的趋势(图4)。四合木的适宜生境总面积由2020s的16651 km^2，减少到2060s的14616 km^2，到2100s略有增加到16042 km^2。四合木最适宜生境面积由2020s的4717 km^2降低到2060s的4556 km^2，再增加到2100s的4678 km^2。四合木中度适宜生境由2020s的11934 km^2，降低到2060s的10060 km^2，后续又增加到2100s的11364 km^2。

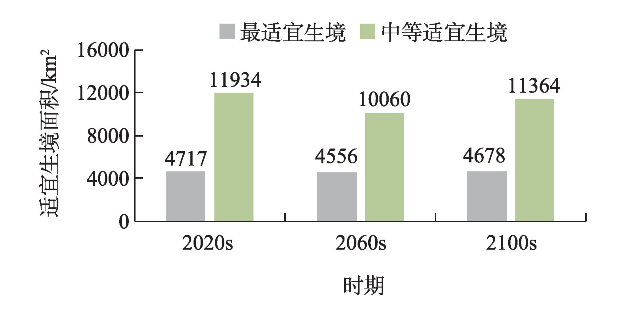


图4 研究区四合木适宜生境面积

Fig. 4 Suitable habitat area of *Tetraena mongolica* in the study area

3.4 四合木自然保护区的GAP分析

四合木保护空缺分析结果显示(图5)，2020s保护区内仅分布14.88%的四合木适宜生境，仍有85.12%的适宜生境在保护区之外。这些未被保护的适生区主要分布在乌海市、鄂尔多斯市、宁夏石嘴山市。2060s和2100s分别有83.25%、83.18%的四合木适宜生境在保护区外。

4 讨 论

本研究表明最湿月降水量是影响四合木适生区分布的最主要影响因子(图2)。张晓玮等[28]以中国沙棘野生分布样点为基础进行的模拟，结果表明水分条件是影响中国沙棘分布的主导气候因子，其次为生长季的热量条件。吴晓萌等[29]在中国白杄分布格局及未来变化研究中显示，影响白杄分布的最主要气候因素是最湿月降水量。这些植物与四合木一样，生长区位于较干旱地区，属于抗旱植物。降水格局变化会对植被的生长发育及分布产生重要影响，所以进一步印证了降水量对四合木生长分布的影响[30-31]。

国内外许多学者广泛证实了气候变化会影响物种的地理分布[32-33]，冉巧等[34-37]研究都印证该结论。其中，吴建国等[38]得出短叶假木贼和梭梭从1991年至2080年，种群范围先增加后减小，更加印证多数物种的分布区会逐渐减少或向高海拔区域移动。本研究表明在未来气候影响下，四合木适生区面积将在2060s缩小，在2100s四合木适生区小幅扩大，但仍小于现代气候条件下适生区面积(图4)。同时四合木适生区逐渐退缩，并逐渐向西北部偏移。许多国内外学者的研究基本一致认为全球变化对物种分布产生影响。这可能是受到内蒙古区域暖旱化影响，也与四合木的生长特性相吻合[39]。

本研究发现2020s研究区内只有14.88%的四合木适宜生境分布在保护区内，且有大量的四合木未被纳入保护区，这些区域主要位于乌海市和鄂尔多斯市杭锦旗(图5)。之所以该地区未被纳入自然保护区范围，可能是因为这些区域位于乌海市市区及其周边旗县，道路众多，耕地广布，人类活动频繁，在此地设立保护区，可能花费巨大，但效果甚微，因此不利于保护区设立。同样，杭锦旗境内分布着大量优质耕地，如放弃耕地改对四合木进行保护，可能会对当地经济产生影响。所以保护四合木时，应尽量在不损害当地经济发展和人民日常生活的基础上，对重点区域进行因地制宜的保护。

在生物多样性保护中，四合木对当地生态环境保护及生态系统稳定具有不可替代的作用[40]。近年来四合木受人类采矿、砍伐、放牧、土地开发及城市化等人为干扰影响强烈，加之其群落结构简单、生态系统脆弱，导致出现生境岛屿化现象，致使四合木分布区面积缩小，种群数量锐减，龄级结构衰退，濒危状况日渐加剧[41]。为保护四合木资源提出以下建议：其一，调整四合木保护区范围，填补乌海市和鄂尔多斯市杭锦旗内的四合木保护空缺区，以减少人类采矿、砍伐、放牧、土地开发及城市化对四合木资源的破坏。在保护区内修路和耕种时，应尽量避免占用四合木生长区，非必要不阻断四合木间的连通性。其二，根据影响四合木分布的气候因素，考虑到四合木适生区随气候变化逐渐退缩并向西北部偏移，调整保护区边界以适应气候变化。必要时可将处于非适生区的四合木进行迁地保护。其三，充分利用全球定位系统、遥感技术和地理信

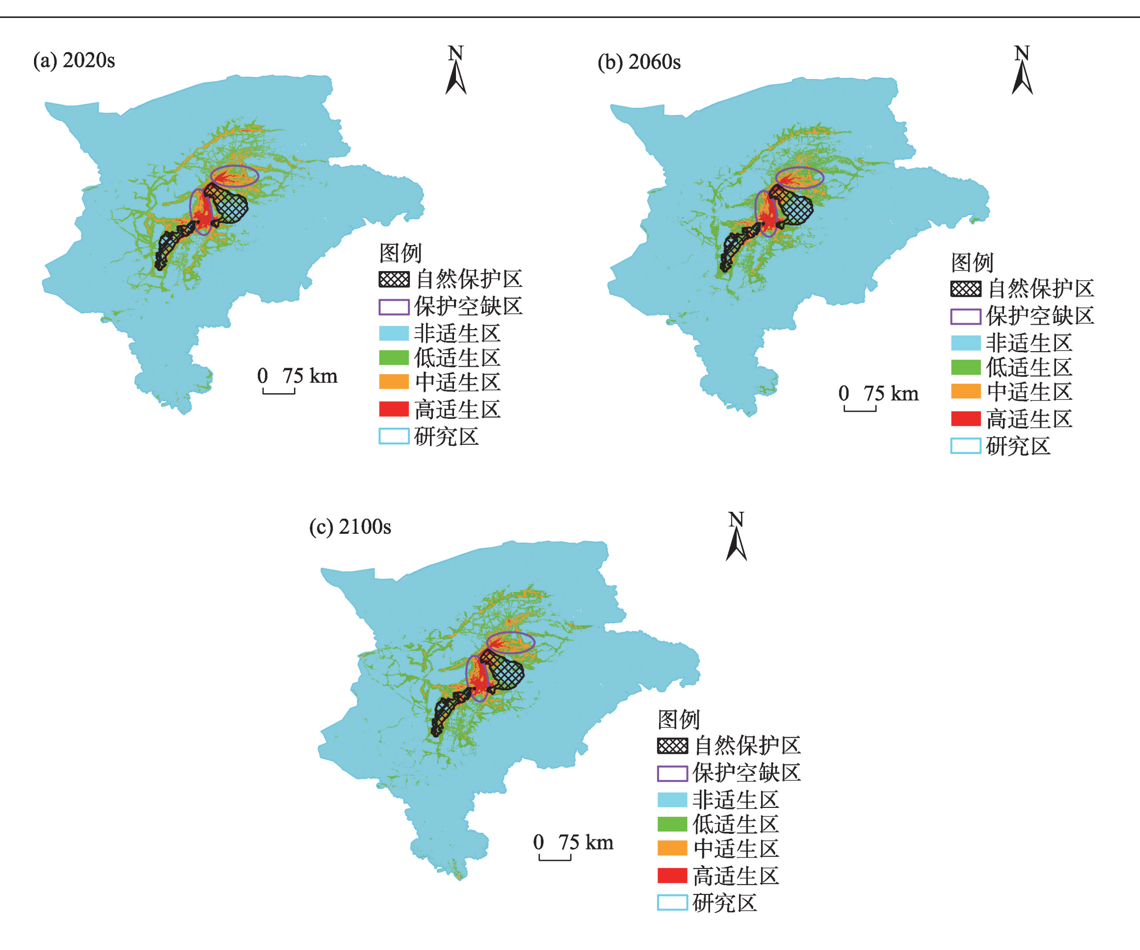


图5 保护区四合木适宜地等级范围

Fig. 5 Suitable grading range of *Tetraena mongolica* in the reserve

息技术3种濒危植物保护技术,将四合木样地纳入监测体系中,长期监测四合木生长状态和生长环境,评估生态环境变化,建立四合木植物基因库,为后续培养提供便利。其四,相关职能部门切实履行职责,制订法律法规和管护办法,清退保护区内的违规工厂和企业,严肃处理破坏四合木保护区生态案件。通过现代媒体大力宣传对四合木保护的重要性,增强民众保护四合木资源的意识。

5 结 论

本研究基于ArcGIS空间分析功能和MaxEnt模型,以当前的四合木分布状况和气候条件,对影响四合木分布的环境变量进行评估,并结合未来气候条件,预测到2100s四合木适生范围的变化,得到以下结论:

(1) 在预测和评估四合木生境选择影响因子及适生区分布中,MaxEnt模型精度较高,被广泛使用。

(2) 适宜的降水量是影响四合木生长的主要影响因素,人为干扰与气候因子共同影响四合木生长范围。

(3) 2020s—2100s四合木适生面积先缩小后扩大,总体低于当前范围。

(4) 建议将乌海市与鄂尔多斯市杭锦旗地区处于保护区外的四合木适生区纳入保护区内。

参考文献(References)

[1] Cowie R H, Bouchet P, Fontaine B. The sixth mass extinction: Fact, fiction or speculation?[J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2022, 97(2): 640-663.

[2] 田红, 李文金, 张玉珍. 高寒草甸对植物多样性短期丧失的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(1): 93-98. [Tian Hong, Li Wenjin, Zhang Yuzhen. Response of alpine meadow to the short-term loss of plant diversity[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(1): 93-98.]

[3] Eileen M, O'Brien. Climatic gradients in woody plant species richness: Towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora[J]. Journal of Biogeography, 1993, 20(2): 181, doi: 10.2307/2845670.

[4] McGlone M S. When history matters: Scale, time, climate and tree diversity[J]. Global Ecology and Biogeography Letters, 1996, 5(6): 309–314.

[5] Su N, Jarvie S, Yan Y Z, et al. Landscape context determines soil fungal diversity in a fragmented habitat[J]. Catena, 2022, 213: 106163, doi: 10.1016/J.CATENA.2022.106163.

[6] 刘文胜, 游简舲, 曾文斌, 等. 气候变化下青藏苔草地理分布的预测[J]. 中国草地学报, 2018, 40(5): 43–49. [Liu Wensheng, You Jianling, Zeng Wenbin, et al. Prediction of the geographical distribution of *Carex moorcroftii* under global climate change based on MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(5): 43–49.]

[7] 秦媛媛, 鲁客, 杜忠毓, 等. 气候变化情景下孑遗植物绵刺在中国的潜在地理分布[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4473–4484. [Qin Yuanyuan, Lu Ke, Du Zhongyu, et al. Potential changes in the geographical distribution of the relict plant *Potaninia mongolica* Maxim in China under climate change scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4473–4484.]

[8] 刘玉婷, 张齐飞, 刘景时, 等. 近20 a新疆南部植被覆盖度时空特征及对气候因素的响应——以塔什库尔干塔吉克自治县为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1481–1489. [Liu Yuting, Zhang Qifei, Liu Jingshi, et al. Temporal and spatial characteristics of vegetation coverage and its response to climatic factors in southern Xinjiang in recent 20 years: A case study of Tajik Autonomous County of Taxkorgan[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1481–1489.]

[9] Robert P A, Enrique M M. Modeling species' geographic distributions for preliminary conservation assessments: An implementation with the spiny pocket mice (Heteromys) of Ecuador[J]. Elsevier BV, 2004, 116(2): 167–179.

[10] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, et al. Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(Suppl. 2): 19729–19736.

[11] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. 生物多样性, 2013, 21(1): 90–98. [Zhu Gengping, Liu Guoqing, Bu Wenjun, et al. Ecological niche modeling and its applications in biodiversity conservation[J]. Chinese Biodiversity, 2013, 21(1): 90–98.]

[12] Cauwer V D, Muys B, Revermann R, et al. Potential, realised, future distribution and environmental suitability for *Pterocarpus angolensis* DC in southern Africa[J]. Elsevier BV: 2014, 315: 211–226.

[13] 吴诗宝, 马广智, 唐玫, 等. 中国穿山甲资源现状及保护对策[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 174–180. [Wu Shibao, Ma Guangzhi, Tang Mei, et al. The status and conservation strategy of pangolin resource in China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2): 174–180.]

[14] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365–372. [Wang Yunsheng, Xie Bingyan, Wan Fanghao, et al. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models[J] Chinese Biodiversity, 2007, 15(4): 365–372.]

[15] 王卫, 杨俊杰, 罗晓莹, 等. 基于Maxent模型的丹霞山国家级自然保护区极小种群植物丹霞梧桐的潜在生境评价[J]. 林业科学, 2019, 55(8): 19–27. [Wang Wei, Yang Junjie, Luo Xiaoying, et al. Assessment of potential habitat for *Firmiana danxiaensis*, a plant species with extremely small populations in Danxiashan National Nature Reserve based on MaxEnt model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(8): 19–27.]

[16] Gao X X, Liu J, Huang Z H. The impact of climate change on the distribution of rare and endangered tree *Firmiana kwangsiensis* using the Maxent modeling[J]. Ecology and Evolution, 2022, 12(8): 9165, doi: 10.1002/ECE3.9165.

[17] 龚洵, 武全安, 张启泰. 自然保护区在保护生物多样性中的作用和意义[J]. 广西植物, 1993, 13(4): 359–366. [Gong Xun, Wu Quanan, Zhang Qitai. The function and significance of reservation in the conserving biological diversity[J]. Guihaia, 1993, 13(4): 359–366.]

[18] 万基中, 王春晶, 韩士杰, 等. 气候变化压力下建立东北红豆杉优先保护区的模拟规划[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(1): 28–32. [Wan Jizhong, Wang Chunjing, Han Shijie, et al. The planning of priority protection area for *Taxus cuspidata* under climate change[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(1): 28–32.]

[19] 黄会清, 钱荣. "植物大熊猫"紧急抢救中[J]. 浙江林业, 2006(1): 41. [Huang Huiqing, Qiang Rong. "Plant giant panda" emergency rescue[J]. Zhejiang Forestry, 2006(1): 41.]

[20] 李红颖, 刘果厚, 韩春荣, 等. 四合木(*Tetraena mongolica*)种子萌发出苗对水分和沙埋的响应[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 910–916. [Li Hongying, Liu Guohou, Han Chunrong, et al. Response of seed germination and seedling emergence of *Tetraena mongolica* to soil water content and sand burial depth[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(5): 910–916.]

[21] 黄蕾. 珍稀濒危植物四合木Genic-SSR标记的开发及种群遗传学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. [Huang Lei. Genic-SSR markers development and population genetic study of the rare and endangered plant *Tetraena mongolica*[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.]

[22] 杜忠毓, 贺一鸣, 房朋朋, 等. 孑遗濒危植物四合木群落组成、物种多样性及土壤养分含量[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3537–3548. [Du Zhongyu, He Yiming, Fang Pengpeng, et al. Community composition, plant species diversity and soil nutrient content of endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim[J] Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3537–3548.]

[23] 智颖飙, 李红丽, 崔艳, 等. 孑遗植物四合木(*Tetraena mongolica*)迁地保护中的光合作用日变化特征与生理生态适应性[J]. 生

态环境学报, 2015, 24(1): 14–21. [Zhi Yingbiao, Li Hongli, Cui Yan, et al. The studies on the photosynthetic characteristics of the endemic relict shrub *Tetraena mongolica* Maxim for the ex-situ conservation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 14–21.]

[24] 李中林, 秦卫华. 荒漠植物的摇篮——内蒙古西鄂尔多斯国家级自然保护区[J]. 生命世界, 2013(10): 48–55. [Li Zhonglin, Qin Weihua. A cradle for desert plants: West Ordos National Nature Reserve, Inner Mongolia[J]. Life World, 2013(10): 48–55.]

[25] 侯丽丽, 都瓦拉, 银山, 等. 基于牧户尺度的草原火灾风险评价——以东乌旗汗敖包嘎查为例[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1059–1070. [Hou Lili, Du Wala, Yin shan, et al. Grassland fire risk assessment based on herder scale: Taking Khan Obo village, eastern Wuzhumuqin Banner as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1059–1070.]

[26] 胡淑萍, 何礼文. 基于MaxEnt与ArcGIS对白水江国家级自然保护区缺苞箭竹适生区分析[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2115–2122. [Hu Shuping, He Liwen. Analysis of suitable distribution areas of *Fargesia denudate* in Baishuijiang National Nature Reserve using MaxEnt model and ArcGIS[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 2115–2122.]

[27] 张杰, 张旸, 赵振勇, 等. 中国飞蝗(*Locusta migratoria*)灾害地理分布模拟及其生物气候因子分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 590–598. [Zhang Jie, Zhang Yang, Zhao Zhenyong, et al. Potential geographic distribution modeling and bioclimatic analysis of outbreak risk for the migratory *Locusta migratoria* in China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 590–598.]

[28] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 等. 基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1420–1428. [Zhang Xiaowei, Jiang Yumei, Bi Yang, et al. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1420–1428.]

[29] 吴晓萌, 叶冬梅, 白玉娥, 等. 基于MaxEnt模型的中国白杄分布格局及未来变化[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 162–172. [Wu Xiaomeng, Ye Dongmei, Bai Yu'e, et al. Distribution pattern and future change of *Pica meyeri* in China based on MaxEnt model[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(1): 162–172.]

[30] Roach D A, Wulff R D. Maternal effects in plants[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1987, 18: 209–235.

[31] Yu H Y, Liu X D, Ma Q H, et al. Nitrogen deposition drives response and recovery in the context of precipitation change and its reversal in an arid ecosystem[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(9): e2022JG006828, doi: 10.1029/2022JG006828.

[32] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3607–3615. [Zhao Zefang, Wei Haiyan, Guo Yanlong, et al. Potential distribution of *Panax ginseng* and its predicted responses to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3607–3615.]

[33] 何远政, 黄文达, 赵昕, 等. 气候变化对植物多样性的影响研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 59–66. [He Yuanzheng, Huang Wenda, Zhao Xin, et al. Review on the impact of climate change on plant diversity[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 59–66.]

[34] 冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 等. 气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2481–2493. [Ran Qiao, Wei Haiyan, Zhao Zefang, et al. Impact of climate change on the potential distribution and habitat fragmentation of the relict plant *Cathaya argyrophylla* Chun et Kuang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2481–2493.]

[35] 吴建国. 未来气候变化对7种荒漠植物分布的潜在影响[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 70–85. [Wu Jianguo. Effects of climate changes on distribution of seven desert plants in China[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1): 70–85.]

[36] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 等. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1243–1250. [Ma Songmei, Wei Bo, Li Xiaochen, et al. The impacts of climate change on the potential distribution of *Haloxylon ammodendron*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1243–1250.]

[37] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(20): 1582–1587. [Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. Effects of global warming on plant phenological changes for the last 40 years in China[J] Chinese Science Bulletin, 2002, 47(20): 1584–1587.]

[38] 吴建国, 吕佳佳, 周巧富. 气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响[J]. 植物学报, 2010, 45(6): 723–738. [Wu Jianguo, Lü Jiajia, Zhou Qiaofu. Potential effects of climate change on the distribution of six desert plants in China[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(6): 723–738.]

[39] 张英娟, 董文杰, 俞永强, 等. 中国西部地区未来气候变化趋势预测[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 342–349. [Zhang Yingjuan, Dong Wenjie, Yu Yongqiang, et al. A prediction of trend of the future climate change in the western China[J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(2): 342–349.]

[40] 白帆, 桑卫国, 刘瑞刚, 等. 保护区对生物多样性的长期保护效果: 长白山自然保护区北坡森林植物多样性43年变化分析[J]. 中国科学(C辑: 生命科学), 2008, 38(6): 573–582. [Bai Fan, Sang Weiguo, Liu Ruigang, et al. Long-term conservation effects of protected areas on biodiversity: A 43-year change in forest plant diversity on the northern slope of Changbai Mountain Nature Reserve[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2008, 38(6): 573–582.]

[41] 李岩, 刘秉儒, 张文文, 等. 贺兰山自然保护区四合木群落特征分析[J]. 宁夏农林科技, 2020, 61(7): 28–31. [Li Yan, Liu Bingru, Zhang Wenwen, et al. Community characteristics of *Tetraena mongolica* in Helan Mountain Nature Reserve[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry, 2020, 61(7): 28–31.]

Potential habitat prediction of *Tetraena mongolica* and its GAP analysis with nature reserves

DONG Ziyan[1], MA Le[1], GAO Shuhan[1], HAN Peng[1], ZHANG Qing[1,2], BAO Yufeng[3]

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China; 2. Grassland Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China; 3. Tongliao Hydrologic Survey Bureau, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China)

Abstract: For efficient conservation of endangered species, it is crucial to clarify the potential distribution of the species and the gap with current nature reserves. To predict the distribution of *Tetraena mongolia* in the present (the 2020s) and future (2060s, 2100s), and to explore the conservation gap with natural reserves，this study estimated the potential habitat of *Tetraena mongolia* in the western Ordos of Inner Mongolia and Ningxia, China using the MaxEnt model and conducted a gap analysis between the potential habitat and current *Tetraena mongolia* nature reserves based on 23 environmental factors. The area under the receiver operator characteristic (ROC) curve of the MaxEnt model was 0.977, indicating that the prediction was accurate. The crucial environmental factors affecting the distribution of *Tetraena mongolia* were precipitation of the wettest month, followed by precipitation of the driest month, distance from the road, isotherm properties, mean temperature of the coldest quarter, and slope. The current suitable area of *Tetraena mongolia* is 4717 km^2; the potential distribution area decreased from the 2020s to the 2100s and shifted to the northwest. Presently, only 14.88% of the suitable habitats of *Tetraena mongolia* are located in protected areas. Large areas of suitable habitats for *Tetraena mongolia* have not been established as nature reserves, which are mainly concentrated in Wuhai City and Hangjinqi Banner of Ordos City. This study provides scientific guidance for the conservation of *Tetraena mongolia* and its natural reserve development.

Key words: *Tetraena mongolica*; MaxEnt model; potential distribution area; GAP analysis